

УДК 537.622

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ СЛОЁВ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ МАГНИТОПОЛЯРИМЕТРИИ

*Д.А. Коновалов, Г.Г. Гумаров, В.Ю. Петухов,  
Р.А. Халиков, В.И. Нурждин*

### Аннотация

Кратко изложена методика исследования ферромагнитных слоев методом сканирующей магнитополяриметрии. Описаны программно-аппаратная реализация магнитометра и алгоритмы измерения и обработки. Приведены результаты исследования ферромагнитных слоев, ионно-синтезированных в магнитном поле. Обнаружена дисперсия магнитной анизотропии относительно направления внешнего магнитного поля, приложенного при имплантации.

**Ключевые слова:** эффект Керра, магнитополяриметр, магнитные свойства, анизотропия, ионная имплантация.

---

### Введение

Создание наведённой магнитной анизотропии в тонких ферромагнитных плёнках представляет значительный интерес, в частности для спиновой электроники. Одним из методов получения анизотропных магнитных плёнок является ионно-лучевой синтез (ИЛС) в магнитном поле [1]. Этот метод позволяет управлять анизотропией локально и, таким образом, создавать магнитные структуры, интересные как с научной, так и с практической точек зрения. В полученных структурах необходимо исследовать магнитную неоднородность образцов по поверхности, изменения доменной структуры и т. п. Локальные магнитные измерения важны для понимания процессов перемагничивания микро- и наноструктур. Для этих целей существуют различные методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Магнитно-силовая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия обладают хорошим разрешением, но не позволяют исследовать магнитные объекты во внешнем магнитном поле. Магнитооптика дальнего поля, несмотря на относительно низкое разрешение по сравнению с ближнепольной магнитооптической (МО) микроскопией, обладает лучшей чувствительностью. Кроме того, магнитооптика дальнего поля может быть совмещена с сильными внешними полями и температурными приставками и является одним из наиболее широко используемых методов для изучения магнитных доменов и электронного спинового транспорта [2, 3].

Существуют два подхода к исследованию поверхности магнитооптическими методами дальнего поля. Первый – это магнитополяризационная микроскопия. Существенным её недостатком является трудность генерации значительных внешних магнитных полей около образца [4]. Другой подход заключается в сканировании поверхности сфокусированным лазерным лучом [5]. Конструкция сканирующих магнитополяриметров относительно проста в реализации и использует доступные оптические компоненты и системы позиционирования.

В настоящей работе проведено исследование локальных магнитных свойств ионно- синтезированных слоёв с помощью разработанной методики сканирующей магнитополяриметрии. Разработка методики включала в себя конструирование и создание системы сканирования и соответствующего программного обеспечения.

### 1. Методика эксперимента

Задача исследования локальных магнитных характеристик в различных точках поверхности образца требует разработки соответствующего программно-аппаратного обеспечения и методики проведения измерений и обработки полученного массива данных.

Ранее нами был сконструирован и изготовлен автоматизированный магнитополяриметрический комплекс (АМК) [6]. Работа АМК основана на измерении интенсивности линейно поляризованного света, отражённого от ферромагнитной поверхности, находящейся во внешнем магнитном поле, и прошедшего через поляризатор-анализатор. Комплекс позволяет регистрировать кривые намагниченности в режимах меридионального и экваториального эффектов Керра. Измерительная часть АМК построена на базе оптического эллипсометра ЛЭФ-3М-1 и имеет в составе, кроме узлов самого эллипсометра, магнитную систему, гониометр со столиком для образцов, блок питания магнита, блок управления током магнита, интегральный датчик Холла SS49E и систему управления, сбора и обработки данных на базе компьютера с универсальной платой ввода-вывода L-780. В качестве источника излучения в АМК используется гелий-неоновый лазер ЛГ-72, входящий в комплект ЛЭФ-3М-1. Регистрация прошедшего через анализатор лазерного излучения осуществляется фотодиодом ФД-2. Для решения задачи исследования локальных магнитных характеристик АМК был дополнен автоматизированной системой перемещения образца относительно зондирующего лазерного луча и системой фокусировки. Конструкция и габариты ЛЭФ-3М-1 позволяют легко разместить дополнительные оптические устройства и элементы системы сканирования.

В методе магнитополяриметрии исследуемая область определяется формой и размерами лазерного пятна на поверхности образца. Дифракмирование луча лазера ухудшает соотношение сигнал/шум на фотоприёмнике, поэтому для уменьшения размеров лазерного пятна применена фокусировка с использованием линзы с фокусным расстоянием 120 мм. Собирающая линза с таким же фокусным расстоянием установлена перед окном фотоприёмника. Минимальный размер пятна сфокусированного лазерного луча определяется такими параметрами, как фокусное расстояние линзы, длина волны излучения, расходимость лазерного пучка, а также различными аберрациями [7]. Минимальный размер лазерного пятна при использованных нами линзах и длине волны лазерного излучения 630 нм составляет  $\sim 50$  мкм.

Программно-аппаратные средства системы сканирования обеспечивают управление положением образца по отношению к внешнему магнитному полю и зондирующему лучу. Столик с образцом может вращаться вокруг вертикальной оси и перемещаться в плоскости образца с высокой точностью. Ось его вращения напрямую связана с валом двигателя программно-управляемого гониометра. Гониометр установлен на двухкоординатном программно-управляемом механизме. В качестве приводов механизированных узлов использованы шаговые двигатели, управление которыми осуществляется с помощью промышленного контроллера PLC-330. Для вращения предметного столика применён шаговый двигатель, обеспечивающий минимальный угол поворота по азимуту 0.45 градуса. Для перемещения в плоскости образца использован модифицированный штатный двухкоординатный безлюфтовый механизм ЛЭФ-3М-1. Он снабжён устройством перемещения на базе

стандартных микрометров. Доработка хвостовой части микрометров позволила присоединить к ним шаговые двигатели ШД-200-1. Точность позиционирования связки микрометр – ШД-200-1 в полшаговом режиме составляет 1.25 мкм.

Методика проведения измерений требует наличия следующих режимов:

- 1) получение семейства кривых намагничивания (СКН) путём сканирования по поверхности образца при произвольном азимуте;
- 2) получение СКН путём сканирования по поверхности образца при различных значениях азимута;
- 3) получение СКН в произвольно выбранной точке на поверхности образца, не совпадающей с осью вращения столика при различных значениях азимута.

Указанные режимы реализованы с использованием вычислительных возможностей компьютера. Задачу исследования произвольной точки на поверхности образца при любых азимутальных положениях предметного столика можно свести к случаю поворота системы отсчёта вокруг начала координат. Для этого за начало координат принимается точка на поверхности образца, совпадающая с осью вращения предметного столика. После установки образца, перед началом комплекса измерений, производится совмещение этой точки с пятном зондирующего луча лазера. Совмещение оси вращения столика с пятном лазерного луча контролируется по полноэкранному изображению предметного столика с образцом, получаемому в реальном масштабе времени с USB-камеры. На это изображение программным способом наложена юстировочная сетка. На первом этапе юстировки камера перемещается в положение, при котором изображение лазерного пятна совмещается с центром юстировочной сетки. На втором этапе предметный столик перемещается в положение, при котором его изображение совмещается со специальными метками на юстировочной сетке. Точность совмещения оси вращения столика с пятном лазерного луча  $\sim 50$  мкм. При изменениях азимутального положения предметного столика программа вычисляет новые координаты исследуемой точки и корректирует положение образца с помощью двухкоординатного механизма.

Работой АМК управляет специально разработанный программный комплекс, созданный в среде LabVIEW. Для сведения к минимуму механических перемещений образца и сокращения времени исследования принята следующая последовательность измерений (см. рис. 1). Параметры циклов измерений задают: диапазон изменения величины магнитного поля; диапазон и шаг изменения азимутального угла; число циклов измерения кривой намагничивания ( $N_c$ ); размер, положение и шаг сканирования исследуемой области. Цикл измерения кривой намагничивания является базовым и выполняется внутри других циклов - цикла сканирования по поверхности и цикла изменения азимута (вращение столика вокруг вертикальной оси). Задавая соответствующие параметры для каждого из циклов, можно реализовать все перечисленные выше режимы измерения.

Каждая кривая намагничивания записывается в отдельный файл вместе с информацией о координате точки на поверхности образца относительно оси вращения, азимутальным положением предметного столика и другими параметрами измерения. При тщательном исследовании образца общее количество кривых намагничивания измеряется тысячами. Ручная обработка такого массива информации практически невозможна. С этой задачей справляется разработанный комплекс программных модулей, объединённых одной интерфейсной оболочкой. В процессе обработки СКН для каждой кривой намагничивания вычисляются значения приведённой остаточной намагниченности  $M_r$  и коэрцитивной силы  $H_c$ , которые сортируются по координатам и азимутам. Сформированный массив данных сохраняется в рабочем бинарном файле, который можно использовать впоследствии при работе с данным СКН.

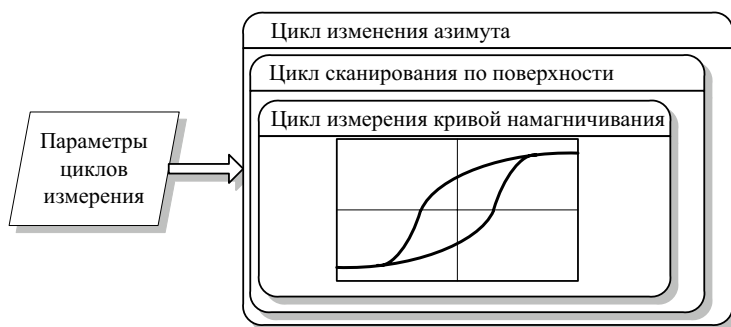


Рис. 1. Диаграмма циклов измерений сканирующего магнитополяриметра

Результатом работы программного комплекса являются топограммы – карты распределения азимутальных зависимостей значений  $M_r$  или  $H_c$  по поверхности образца в пределах исследованной области. В каждой исследуемой точке имеется возможность вывода зарегистрированных кривых намагничивания для всех значений азимута.

Измерение одной кривой намагничивания производится в течение нескольких периодов модуляции магнитного поля (до заполнения буфера АЦП). Частота модуляции магнитного поля задается программно и может изменяться от 0 до 100 Гц. При частоте модуляции 40 Гц получение одной кривой намагничивания занимает доли секунды. Время, необходимое для исследования одной точки поверхности, определяется количеством циклов измерения кривой намагничивания ( $N_c$ ) и шагом изменения азимута. Для снятия топограммы азимутальной зависимости остаточной намагниченности участка образца размером  $10 \times 10$  мм с шагом по координате 1 мм,  $N_c = 7$  и с шагом по азимуту 9 градусов требуется около 1 ч.

## 2. Результаты исследования

Образцы тонких магнитных слоёв были получены методом ионно-лучевого синтеза во внешнем магнитном поле. В качестве подложек брались монокристаллические пластины кремния марки КДБ-10, вырезанные вдоль плоскости (111). Имплантация проводилась на ускорителе ИЛУ-3 ионами  $\text{Fe}^+$  с энергией 40 кэВ при плотности ионного тока  $5 \text{ мкА/см}^2$  при комнатной температуре. Доза имплантации составляла  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Внешнее магнитное поле напряжённостью  $H_i = 200 \text{ Э}$  было приложено параллельно плоскости кремниевой пластины. Исследования данных слоёв, проведённые ранее методами мёсбауэровской спектроскопии конверсионных электронов и рентгеновской дифракции при скользящих углах, показали, что основной кристаллической фазой в синтезированном слое при таких режимах имплантации является ферромагнитный силицид  $\text{Fe}_3\text{Si}$  в полидисперсном состоянии [1].

Кривые намагничивания, полученные на магнитометре методом меридионального эффекта Керра, показаны на рис. 2, а, б. Измерения проводились в режиме накопления ( $N_c = 7$ ) с шагом по магнитному полю  $0.1 \text{ Э}$  при размерах зондирующего лазерного пятна  $\sim 100 \text{ мкм}$ . В центре образца в направлении, параллельном направлению  $H_i$ , регистрируется прямоугольная петля гистерезиса (направление оси лёгкого намагничивания). В направлении, перпендикулярном направлению ОЛН, наблюдается практически безгистерезисная петля с полем насыщения около  $5 \text{ Э}$ , что указывает на однодоменный характер синтезированных частиц и коге-

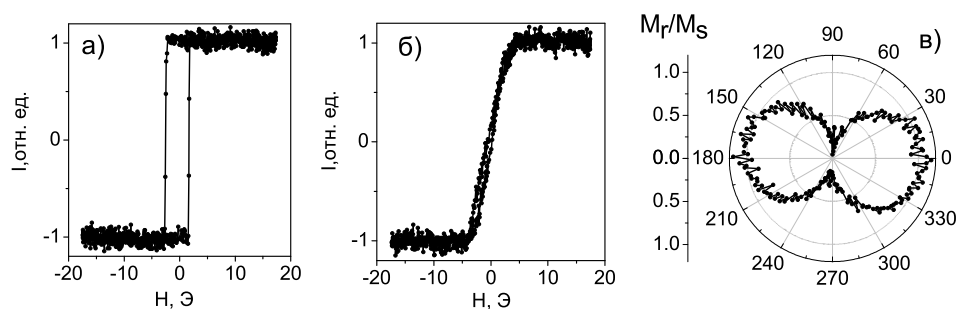


Рис. 2. Кривые намагничивания, полученные на магнитополяриметре: а) в направлении ОЛН, б) в направлении оси трудного намагничивания; и азимутальная зависимость приведённой остаточной намагниченности  $M_r/M_s$  (в)

рентный характер вращения намагниченности. Азимутальная зависимость приведённой остаточной намагниченности (отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения) показанная на рис. 2, в, имеет характер  $\cos^2 \phi$  ( $\phi$  – угол, отсчитываемый от направления ОЛН), что соответствует модели когерентного вращения.

Измерения на магнитополяриметре, проведенные в режиме сканирования, показали, что на всей поверхности образцов наблюдается одноосная анизотропия (рис. 3), причём направление ОЛН в среднем соответствует направлению магнитного поля  $H_i$  при имплантации. При этом в отдельных точках поверхности форма азимутальных зависимостей отклоняется от закона  $\cos^2 \phi$ , то есть наблюдается неоднородность магнитных свойств. Направление осей лёгкого намагничивания заметно отличается в различных точках поверхности образцов – наблюдается так называемая дисперсия анизотропии. Отметим, что контрольные эксперименты по ионно-лучевому синтезу показали, что слои, синтезированные без внешнего магнитного поля, в целом не проявляют чётко выраженной магнитной анизотропии.

Известно, что ионно-синтезированный слой состоит из разориентированных кристаллитов. Каждый кристаллит, наряду с однородной одноосной анизотропией, обладает кристаллографической анизотропией, величина и ориентация которой изменяются от кристаллита к кристаллиту. Эта изменяющаяся в пространстве локальная анизотропия вызывает дисперсию направлений ОЛН. Однако благодаря обменным и магнитостатическим силам, препятствующим резким изменениям намагниченности  $M$ , направление магнитного момента для каждого кристаллита не определяется простым совместным действием однородной одноосной и кристаллографической анизотропии. Распределение намагниченности (а также анизотропия в каждой точке поверхности) в слое должно определяться на основе микромагнитных расчётов, учитывающих многие компоненты локальной энергии. В частности, в работах [8, 9] показано, что дисперсия анизотропии может возникать в результате конкуренции обменного взаимодействия и магнитной анизотропии.

### 3. Выводы

В результате проведённых исследований магнитных свойств тонких ферромагнитных слоёв, полученных методом ионно-лучевого синтеза во внешнем магнитном поле, было установлено, что магнитные характеристики анизотропны в плоскости слоя, причём анизотропия носит в целом одноосный характер. При этом впервые

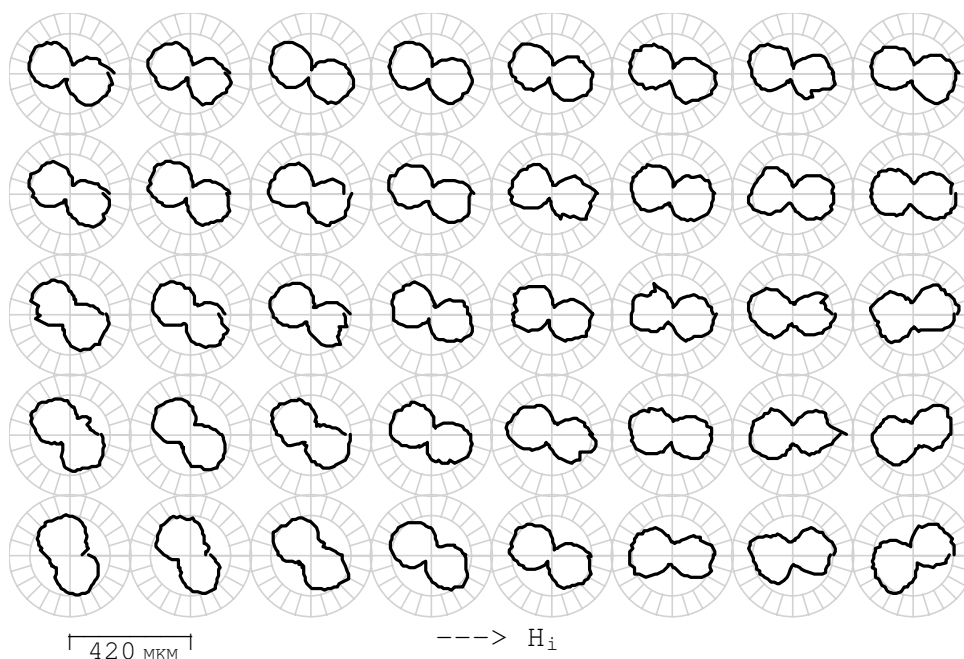


Рис. 3. Топограмма азимутальных зависимостей приведённой остаточной намагниченности для образца кремния, имплантированного ионами  $\text{Fe}^+$  во внешнем магнитном поле  $H_i = 200 \text{ Э}$

обнаружена дисперсия направлений ОЛН в тонких ферромагнитных слоях, полученных методом ИЛС в магнитном поле.

Для изучения локальных магнитных свойств тонких ферромагнитных слоёв был сконструирован и изготовлен сканирующий магнитополяриметр. Разработано программное обеспечение для управления магнитополяриметром и предварительной обработки результатов измерений.

Авторы выражают признательность Н.В. Курбатовой и М.Ф. Галяутдинову (КФТИ КазНЦ РАН) за содействие в работе и полезные обсуждения.

Работа частично поддержана грантами по программе фундаментальных исследований Президиума РАН и по программе ОФН РАН «Физика новых материалов и структур».

### Summary

*D.A. Konovalov, G.G. Gumarov, V.Y. Petukhov, R.A. Khalikov, V.I. Nuzhdin.* Study of Magnetic Properties of Ion-Synthesized Layers by Scanning Magnetic Polarimetry.

Scanning magnetic polarimetry methodology for studying ferromagnetic layers is described. Software-hardware implementation of the magnetometer and measurement and processing algorithms are presented. Results of studying ferromagnetic layers ion-synthesized in the magnetic field are given. Dispersion of the magnetic anisotropy with respect to the direction of the magnetic field applied at the implantation is found.

**Key words:** Kerr effect, magnetopolarimeter, magnetic properties, anisotropy, ion implantation.

## Литература

1. *Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Zhikharev V.A., Valeev V.F., Khaibullin R.I.* Investigation of Magnetic Anisotropy of Silicide Films Ion-beam Synthesized in External Magnetic Field // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. – 2009. – V. 267. – P. 1600–1603.
2. *Kotissek P., Bailleul M., Sperl M., Spitzer A., Schuh D., Wegscheider W., Back C.H., Bayreuther G.* Cross-sectional imaging of spin injection into a semiconductor // Nat. Phys. – 2007. – V. 3. – P. 872–877.
3. *Cormier M., Ferre J., Mougin A., Cromieres J.-P., Klein V.* High resolution polar Kerr magnetometer for nanomagnetism and nanospintronics // Rev. Sci. Instrum. – 2008. – V. 79. – Art. 033706.
4. *Ramesh Mahadevan, Crowell R.W., Dey Subrata.* A small spot Kerr photometer system // Rev. Sci. Instrum. – 1993. – V. 64, No 7. – P. 1931–1936.
5. *Wright C.D., Clegg W.W., Boudjemline A., Heyes N.A.E.* Scanning Laser Microscopy of Magneto-Optic Storage Media // Jpn. J. Appl. Phys. – 1994. – V. 33. – P. 2058–2065.
6. *Коновалов Д.А., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Нуждин В.И.* Автоматизированный комплекс для исследования магнитных характеристик ферромагнитных материалов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 5–6. – С. 122–129.
7. *Григорьянц А.Г.* Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
8. *Игнатченко В.А.* Магнитная структура тонких магнитных пленок и ФМР // ЖЭТФ. – 1968. – Т. 54, Вып. 1. – С. 303–311.
9. *Ymry Y.* Random field instability of the ordered state of continuous symmetry // Phys. Rev. Lett. – 1975. – V. 35, No 21. – P. 1399–1401.

Поступила в редакцию  
19.02.10

---

**Коновалов Дмитрий Александрович** – главный специалист отдела телекоммуникационных технологий Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [dak@kfti.knc.ru](mailto:dak@kfti.knc.ru)

**Гумаров Габдрауф Габдрашитович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник кафедры физики твёрдого тела Казанского государственного университета, старший научный сотрудник лаборатории радиационной химии и радиобиологии Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [gumarov@kfti.knc.ru](mailto:gumarov@kfti.knc.ru)

**Петухов Владимир Юрьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела Казанского государственного университета, заведующий лабораторией радиационной химии и радиобиологии Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [petukhov@kfti.knc.ru](mailto:petukhov@kfti.knc.ru)

**Халиков Руслан Альбертович** – аспирант лаборатории радиационной химии и радиобиологии Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [khalikoff@gmail.com](mailto:khalikoff@gmail.com)

**Нуждин Владимир Иванович** – научный сотрудник лаборатории радиационной физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [Nuzhdin@kfti.knc.ru](mailto:Nuzhdin@kfti.knc.ru)